

Zur Anwendung eines Beschleunigungssensors in Antriebssystemen

P.-K. Budig, KDT; P. Chrapko; Karl-Marx-Stadt

Es gibt eine Tendenz, den Regelungsbereich der Vorschubgeschwindigkeit moderner Werkzeugmaschinen zu erweitern [1] [5]. Außerdem existieren z. Z. die Höchstmomentelektromotoren, mit denen die Einsparung von mechanischen Getriebestufen möglich würde [2]. Dabei geht es um außerordentlich niedrige Vorschubgeschwindigkeiten oder Drehzahlen des Motors. Wie die Praxis zeigt, haben traditionelle Geschwindigkeits-Kontrollsysteme (z. B. mit Tachogeneratoren oder Impulsgebern) in niedrigen Bereichen meistens größere Informationsverluste. Das ist verbunden mit ungenügender Genauigkeit durch Kommutierungsstörungen und niedrigem Niveau des Ausgangssignals bei Tachogeneratoren, auch durch größe Abstände zwischen den Impulsen des inkrementalen Lagegebers, mit denen gewöhnlich automatisierte Antriebe ausgerüstet werden.

Eine neue Methode, die im Institut für Werkzeuge und Werkzeugmaschinen in Moskau (MOSSTANKIN) unter Leitung von Prof. O. P. Michailow entwickelt wurde, besteht in folgendem [3] [5]: Im Antriebssystem gibt es keinen Tachogenerator; statt dessen steht ein zusätzlicher Sensor — Beschleunigungssensor (Accelerometer) zur Verfügung. Das Ausgangssignal des Sensors kommt an einem Integrator an, und das Integratorsignal überträgt die gesamte Information über Vorschubgeschwindigkeit bzw. Drehzahl.

Es ist jedoch die bekannte Schwierigkeit des langsamen zeitlichen Abgangs (Trend) des Integratorsignals und damit des Geschwindigkeitsmittelwertes zu beachten. Das führt dazu, daß eine ständige Korrektur nötig ist, die mit dem schon traditionell zur Verfügung stehenden Impulslagegeber durchgeführt wird. Ein ähnliches Prinzip wird in der Flugzeugnavigation benutzt.

Bei der Anwendung von Beschleunigungssensoren in Rückkopplungssystemen genügen bereits einfache, billigere Impulslagegeber mit einer geringeren Anzahl von Skalenwerten den Anforderungen. Es ist möglich, hier Mikrorechnersysteme zu nutzen. Bild 1 zeigt eine vereinfachte Prinzipschaltung.

1. Simulation des Antrichssystems mit b-Geberrückkopplung

Bild 2 demonstriert die Drehzahlregelung mit b-Geberrückkopplung. Die Übertragungsfunktion des Beschleunigungssensors ist

$$G_{\rm B}(p) = \frac{\Gamma_{\rm B}}{T_{\rm B}^2 p^2 \div 2\beta T_{\rm B} \div 1} \tag{1}$$

 $V_{\mathbf{B}}$ Verstärkungsfaktor des Meßwandlers

 $T_{\rm B}$ Zeitkonstante des Beschleunigungssensors

β Dämpfungsfaktor des beweglichen Systems des Beschleunigungssensors.

Durch außerordentlich geringe Auswertfehler des digitalen Integrators kann man den Integrationsprozeß als ideal bezeichnen. Wird der Stromreglerkreis dem Betragsoptimum angepaßt, ist die Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises

$$G_{\rm S}(p) = \frac{1/V_{\rm f}}{2 \tau^2 p^2 + 2 \tau p + 1} \tag{2}$$

r Summe der parasitären Zeitkonstanten der Regelstrecke. Falls der Drehzahlregler proportionales Verhalten hat, ergibt sich die Störungsübertragungsfunktion des Antriebs zu

$$G_{\rm in}(p) = \frac{1}{J \cdot p + G_{\rm B} \cdot G_{\rm D} \cdot G_{\rm S} \cdot k_{\rm M}}.$$
(3)

Damit gilt für stationäre Zustände folgende Belastungscharakteristik

$$\frac{m}{d\Omega} = \frac{V_{\rm B} V_{\rm D} k_{\rm M}}{V_{\rm I}} = \frac{k_s T_{\rm B}^2 V_{\rm D} k_{\rm M}}{V_{\rm I}}.$$
 (4)

Prof. Dr. sc. techn. Dr. h. c. Peter-Klaus Budig, z. Z. der Erarbeitung des Beitrages Dekan der Fakultät für Elektroingenientwesen der TU Karl-Marx-Stadt, in der Regierung Modrow Muister für Wissenschaft und Technik, Dipl.-Ing. Pawel Chrapko ist Aspirunt an der TU Karl-Marx-Stadt. Wenn man also unter den Bedingungen des P-Reglers die Zeitkonstante $T_{\rm B}$ steigern will, so ist das mit bestimmten Einschränkungen für die b-Geberkonstruktion verbunden. Diese Begrenzung kann durch die Anwendung des PI-Reglers beseitigt werden.

Für die richtige Auswahl des Verstärkungsfaktors $V_{\mathbf{B}}$ muß noch die Bedingung erfüllt werden

$$V_{\rm B} = V_{\rm TM} \tag{5}$$

 V_{TM} Übertragungsfaktor des Rückkopplungskreises, der dem Drehzahlregler angepaßt war.

Um eine Analyse im Zeitbereich durchführen zu können, lassen sich die Zustandsgleichungen auch zusammengefaßt in Vektorform schreiben:

$$\dot{X} = AX + B_{\rm u} U + B_{\rm M} M \tag{6}$$

X, X Spaltenvektoren der Zustandsgrößen, ihre Änderungen A Systemmatrix

B_U, B_M Steuer- und Störungsmatrix.

Nach der Lösung von (6) durch einen Computer ergeben sich die Verlaufskennlinien für verschiedene Werte von $T_{\rm B}$ und β . Bild 3 zeigt die Führungs- und Belastungsverlaufskennlinien (symmetrisches Optimum). Die Analyse zeigt, daß das Verhältnis zwischen der Durchtrittsfrequenz $\omega_{\rm d}$ des Antriebssystems und der Eigenfrequenz des Accelerometers $\omega_{\rm B}$ eine richtige Auswahl der Beschleunigungssensoren erfordert. Bei $\omega_{\rm d}/\omega_{\rm B} \ge 3$ sind die Übergangsfunktionen ähnlich wie die des optimal angepaßten Antriebs. Es ist wichtig, daß der Dämpfungsfaktor, von dem in bedeutendem Ausmaß die Konstruktionskompliziertheit des Sensors abhängt, einen breiten Auswahlbereich — vom Optimalwert $\beta=1/|\widehat{2}|$ bis $\beta:=0,1$ — hat. Die Simulation zeigt auch, daß dabei die Reglerstruktur unverändert bleiben kann.

2. Beschleunigungsregler im Antriebssystem

Die höhere dynamische Genauigkeit, die der regelbare Vorschubantrieb der modernen Werkzeugmaschine haben muß, ist durch die Schaffung des gekoppelten Kreises für die Beschleunigungsregelung erreichbar. Wenn man den Stromregler nach Bild 2 durch einen Beschleunigungsregler ersetzt, erhalten wir als Ergebnis einen Gleichstromantrieb mit Drehzahlregelung und unterlagerter Beschleunigungsregelung. Als Übertragungsfunktion des offenen Be-

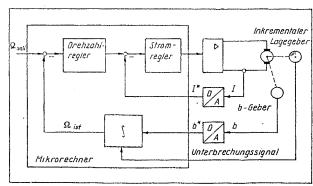
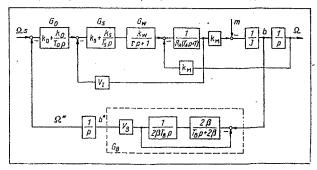


Bild 1. Prinzipschaltung des Antriebs

Bild 2. Signaiflußplan der Drehzahlregelung mit der b-Geberrückkopplung



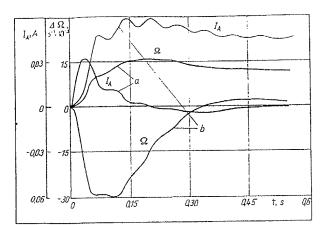


Bild 3. Simulation des Antriebssystems a Führungsübergaugsfunktionen, $\omega_{\rm d}/\omega_{\rm B}=2$, $\beta=0.4$ b Störungsübergaugsfunktionen, $\omega_{\rm d}/\omega_{\rm B}=2.5$, $\beta=0.2$

schleunigungskreises ergibt sich beim PI-Beschleunigungsregler

$$G_{\rm BK}(p) = \frac{T_{\rm BR} p + 1}{T_{\rm d} p} \frac{k_{\rm W}}{(\tau p + 1) (T_{\rm A} p + 1)} \frac{k_{\rm M}}{J \cdot R_{\rm A}}.$$
 (7)

Als Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises ergibt sich unter der Bedingung $T_{BR} = T_A$

$$\Phi_{\rm BK}(p) = \frac{1/V_{\rm B}}{\frac{T_{\rm d} T_{\rm M} k_{\rm M}}{k_{\rm W} V_{\rm B}} \tau p^2 + \frac{T_{\rm d} T_{\rm M} k_{\rm M}}{k_{\rm W} V_{\rm B}}}.$$
 Wenn gilt: (8)

$$\frac{T_{\rm d} T_{\rm M} k_{\rm M}}{k_{\rm W} V_{\rm B}} = 2 \tau \tag{9}$$

hat der geschlossene Kreis die betragsoptimale Einstellung. Also ergibt sich Td aus

$$T_{\rm d} = \frac{2 \tau k_{\rm W} V_{\rm B}}{k_{\rm M} T_{\rm M}}.$$

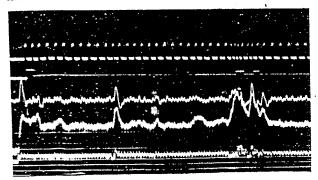
Damit kann man den Kreis mit verbesserten dynamischen Eigenschaften erhalten, z.B.:

- Es gibt Trägheitsmomentkompensation.
- Jeder Abschnitt der Lage- und Drehzahlreglerstrecke enthält keine große Zeitkonstante (ideale I-Glieder).
- Die dynamische Belastungsfestigkeit des Antriebs steigt.
- Die Drehzahlschwingungen durch sehnellere Beschleunigungsrückkopplung wird kompensiert.

Man kann zeigen, daß in diesem Kreis ein optimaler Digitalregler sein kann [3] [4]. Damit werden die Beschleunigung und der Geschwindigkeitsfehler mit minimaler Ausregelzeit zu Null.

Da das mechanische Übertragungssystem des Vorschubantriebes aus mindestens zwei elastisch verbundenen bewegten Teilmassen besteht, gibt es auch die Möglichkeit, mit Hilfe einer Beschleunigungsrückkopplung die Geschwindigkeitsschwingungen an der Last zu

Bild 4. Experimentelle Kurven für Geschwindigkeitsmittelwert $0.04~\mathrm{s}^{-1},\,z\,=\,2700$ You oben mach unten: Impulsiolge des Lagegebers; digitales Signal mit Tastperiode T_0 ; Beachleunigung b (i); Integrationssignal mit Tastperiode T_0 ; Beachleunigung b (ii); Integrationssignal mit Tastperiode T_0 ; Spannung des Gleichstromtachometers



unterdrücken [6]. Bei dem digitalen Geschwindigkeitsmeßsystem wird das Signal des inkrementalen Lagegebers periodisch mit der Tastperiode T_0 gespeichert und während der folgenden Periode als Rückkopplungssignal genutzt. Es gibt für die Steuerungsalgorithmen von digitalen Systemen eine angenäherte Gleichung [8]:

$$T_0/T_{95} = 1/15 \cdots 1/4 \tag{10}$$

Tes Ausregelzeit mit dem Toleranzband 5%.

Außerdem ist die Bedingung des Abtasttheorems zu erfüllen. Sogar bei der Impulsmenge $z=5000\cdots 6000$ sind diese Bedingungen für Drehzahlen $\Omega = 3 \cdots 5 \, \text{min}^{-1}$ nicht erfüllbar. In unserem Fall gibt es die Möglichkeit, durch einen Beschleunigungsgeber zusätzlich die Winkelbeschleunigung b (t) im jeweiligen Zeitbereich [t_0 , t] zu messen. Dann ergeben sich Integralwerte zu

$$I_{\cdot}(t) = \int_{t_0}^{t} b(\tau) d\tau$$
 (11)

als die Geschwindigkeitsänderung hinsichtlich Ω (t_0). Nachdem b (t) mit der Tastperiode Ta diskret geworden ist. ergibt sich b (p) mit nachgeschaltetem Halteglied im Unterbereich diskreter Laplace-Transformation [9] als

$$b(p) = \sum_{n=0}^{\infty} b(n T_n) e^{-n T_n p}.$$
(12)

Nach der Digitalintegration ergibt sich der Geschwindigkeitswert im $T_0 ext{-}$ Bereich (Trapezmethode) zu

$$\Omega(n) = \frac{T_a}{2T} \sum_{i=1}^{n} [b(i) + b(i-1)].$$
 (13)

Bild 4 zeigt experimentelle Kurven für ein mit dem Beschleunigungssignal aufgebautes Antriebssystem. Die Datenverarbeitung wurde mit dem Computer DVK-3M2 (LSI-11) durchgeführt.

3. Zusammenfassung

- 1. Um den Regelungsbereich des Vorschubantriebes zu vergrößern, sind neue und traditionelle Methoden für die Schaffung von Drehzahlrückkopplungssystemen durch Beschleunigungsmessung des bewegten mechanischen Werkzeugmaschinenteils erforderlich.
- 2. Die Beschleunigungsrückkopplung steigert die dynamische Belastungsfestigkeit von Antrieben, kompensiert Drehzahlschwingungen bei elastisch gekoppelten Mehrmassensystemen des Antriebes.
- 3. Die b-Steuerung verringert die Abtastperiode digitaler Steuerungssysteme und macht diese unveränderlich.
- 4. Die Beschleunigungssteuerung löst die Aufgabe einer Interpolation für inkrementale Lagegeber.

Literatur

- [1] Pusch, W. E.: Werkzeugmaschinen für Metallbearbeitung. Moskau: Maschino-
- [2] Micheilow, O. P.: Hochmomentelektromotoren für Vorschubantriebe von Me-
- [3] Zhradad, 2017. Indicate Hallschneidenwerkzeugmaschinen. Moskau: NIIMASCH 1979
 [3] Chrapko, P. I.: Geber für rechnergeregelte Elektroantriebe auf der Basis von Beschleunigungsaufnehmern. WNIITEMR, 364 MSCH2, 1985
- [4] Kuo, B.: Theorie und Projektierung von Rechnersteuerungssystemen, Moskau: Maschinostroenie 1980
- [5] Michailov, Q. P., Chrapko, P. I.: Träge Steuerungen für Vorschubelektroantriebe von Metallschneidenwerkzeugmaschinen. Stanki i Instrument, Nr. II 1986. S. 25-27
- Blorzov, J. A.: Sokolovskii, G. G.: Thyristorisierte Elektroantriebe mit Rück-kopplungen. Leningrad: Energija 1979 [7] Riefensfahl, U.: Optimicrang beschleunigungsgeführter Antriebe. ELEKTRIE, Berlin 31 (1977) 4, S. 181-186
- Berlan 31 (1977) 4, 5, 101 100 [8] Jeermann, R., Digitale Regelsysteme, Berlin; Springer-Verlag 1977 [9] Schönfeld, L.; Habiyer, E.: Automatisierte Elektroautriebe, Berlin; VEB Verlag Technik 1981